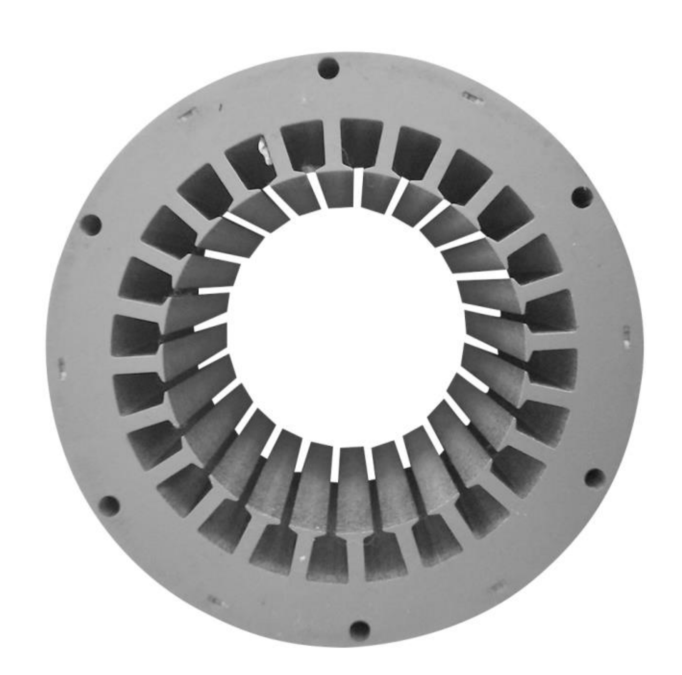
Пересчет обмотки асинхронного двигателя при ремонте



В настоящем документе представлена только часть указанного издания, касающаяся практического пересчета обмоток асинхронных двигателей при ремонте.

Кокорев А. С.

"Справочник молодого обмотчика электрических машин" 6 издание, 1985 г.

Rev. 03   26 Nov 2020

V. Расчеты обмоток асинхронных двигателей при ремонте.
23. Выбор и расчет основных параметров.

Двухслойные обмотки применяют в трехфазных двигателях единых серий при наружном диаметре статора больше 200 – 250 *мм*., однослойные обмотки используют обычно при меньших диаметрах. Шаг обмотки в двухслойных обмотках статоров асинхронных двигателей определяется по формуле:

$$y = \frac{\beta \times z_1}{2p}$$

где: β – укорочение шага; z_1 – число пазов статора; $2p$ – число полюсов.

Для обмоток с числом полюсов $2p > 2$ принимают $\beta = 0,78 \div 0,83$; при $2p = 2$ укорочение берут $\beta = 0,58 \div 0,63$.

Таблица 39. Обмоточные коэффициенты трехфазных однослойных обмоток.

q	*kw*	*q*	*kw*
1	1,000	4	0,958
1,5	0,960	4,5	0,955
2	0,966	5	0,957
2,5	0,957	6	0,957
3	0,960	8	0,956
3,5	0,956	–	–

Обмоточный коэффициент *kw* однослойных обмоток в трехфазных двигателях зависит от числа пазов на полюс и фазу *q* (табл. 39), двухслойных – также и от шага у (табл. 40). Большое влияние на степень повреждаемости обмотки при укладке имеет технологический коэффициент заполнения паза, определяемый формулой:

$$f_{\text{П}} = \frac{n \times D^2}{F'}$$

где: n – число проводников в пазе; D – диаметр провода с изоляцией, мм; F' – площадь сечения паза в свету за вычетом пазовой изоляции и клина, *мм²*.
Механические нагрузки на изоляцию зависят от коэффициента заполнения паза $f_{\text{П}}$, от типа изоляции паза, марки и диаметра провода. Оптимальные значения $f_{\text{П}}$ (табл. 41) обеспечивают хорошую производительность и сохранение изоляции при укладке обмотки. Для ускорения расчетов при ремонте обмоток и предварительном выборе диаметра провода часто используют более удобный в этих случаях коэффициент заполнения паза, определяемый как отношение площади изолированных проводников к площади паза:

$$k\text{п} = \frac{0{,}785 \times n \times D^2}{F}$$

Этот коэффициент *k*п упрощает расчет, так как при его применении площадь паза определяется без учета изоляции. Он зависит от формы паза, типа обмотки и мощности двигателя (табл. 42).
Полное число проводников в пазе:

$$n = n_{\text{эл}} \times N$$

где $n_{\text{эл}}$ – число элементарных (параллельных) проводников; N – число эффективных проводников в пазе. При пересчетах обмоток старой обмотке присваивается индекс "ст", новой (после перемотки) индекс "нов", $U_{\text{ст}}$, $U_{\text{нов}}$, $N_{\text{ст}}$, $N_{\text{нов}}$ и т. д.

Площади пазов (*мм*²) определяются по следующим формулам (число π = 3,14159/2 ≈ 1,57):

трапецеидальный паз со скругленной частью под клин (рис. 10, а):

$$F\text{а} = 1{,}57 \times r_1^2 + 0{,}5 \times (h_1 - r_1) \times (b_1 + b_2)$$

трапецеидальный паз (рис. 10, б):

$$F\text{б} = 0{,}5 \times h_2 \times (b_1 + b_3) + 0{,}5 \times (h_1 - h_2) \times (b_1 + b_2)$$

грушевидный паз (рис. 10, в):

$$F\text{в} = 1{,}57 \times (r_1^2 + r_2^2) + 0{,}5 \times (h_1 - r_1) \times (b_1 + b_2)$$

трапецеидальный паз со скругленной частью под клин и скруглениями на дне паза (рис. 10, г):

$$F\text{г} = 1{,}57 \times (r_1^2 + \text{г}_2^2) + 0{,}5 \times (h_1 - r_1) \times (b_1 + b_2) + r_2 \times (b_2 - 2 \times r_2)$$

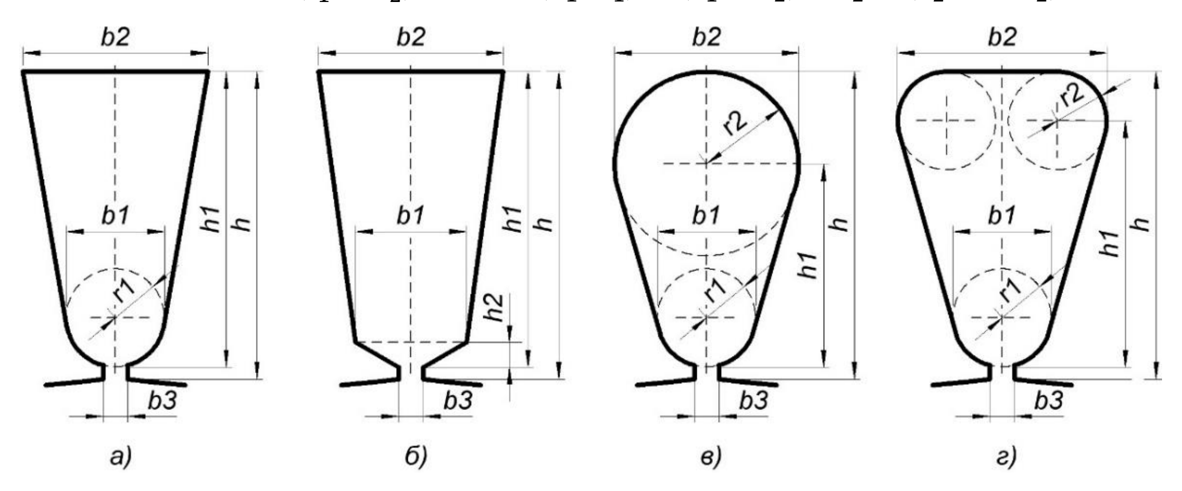


Рис. 83. Формы пазов (а, б, в, г) статора для всыпных обмоток.

При пересчетах обмоток в тех случаях, когда известны данные старой обмотки (число проводников в пазе n, диаметр D и марка провода), для проверки размещения новой обмотки в пазе используют соотношение:

$$n_{\text{НОВ}} \times D_{\text{НОВ}}^2 \leq n_{\text{СТ}} \times D_{\text{СТ}}^2$$

где: $n_{\text{НОВ}}$, $D_{\text{НОВ}}$ – число проводников в пазе и диаметр изолированного провода новой обмотки, *мм*.; $n_{\text{СТ}}$, $D_{\text{СТ}}$ – то же, для старой обмотки.

Таблица 40. Обмоточные коэффициенты трехфазных двухслойных обмоток.

q	*kw* при шаге обмотки по пазам															
	1–3	1–4	1–5	1–6	1–7	1–8	1–9	1–10	1-11	1–12	1–13	1–14	1–15	1–16	1–17	1–18
1	0,860	1,000	0,866	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1½	–	0,831	0,945	0,945	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	–	–	0,836	0,933	0,966	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2¼	–	–	–	0,877	0,941	0,954	0,915	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2½	–	–	–	0,827	0,907	0,950	0,950	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3	–	–	–	–	0,831	0,902	0,945	0,960	–	–	–	–	–	–	–	–
3½	–	–	–	–	–	0,831	0,884	0,930	0,953	0,953	–	–	–	–	–	–
4	–	–	–	–	–	–	0,831	0,885	0,926	0,950	0,958	–	–	–	–	–
4½	–	–	–	–	–	–	–	0,827	0,877	0,916	0,940	0,954	0,954	–	–	–
5	–	–	–	–	–	–	–	–	0,829	0,875	0,910	0,935	0,951	0,957	–	–
5½	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,827	0.869	0,902	0,928	0,945	0,954	0,954
6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,828	0,866	0,900	0,925	0,942	0,952
8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,719	0,758	0,794	0,828	0,876

Таблица 41. Оптимальные значения $f_П$ для всыпных обмоток при ручной намотке.

Пазовая изоляция	Марка провода	$f_П$ при диаметре провода d, *мм*.	
		до 1,25	более 1,25
Пленкоэлектрокартон, электрокартон с лакотканью	ПЭЛБО	0,68	0,65
	ПЭВ-2, ПЭМ-2	0,72	0,70
Гибкие миканиты, слюдиниты, слюдопласты, пленкосинтокартоны	ПСД, ПСДК, ПСДТ, ПСДКТ	0,65	0,62
Пленкосинтокартоны, гибкие миканиты, слюдиниты, слюдопласты	ПЭТВ, ПЭТ-155	0,72	0,70

Примечание. Для двухслойных обмоток коэффициент заполнения паза должен быть уменьшен на 5%.

Таблица 42. Величина *k*п для всыпных обмоток при ручной намотке.

Обмотка	Паз	При мощности, *кВт*.		
		до 1	1 – 10	10 – 100
Однослойная	Трапецеидальный (см. рис. 83, а, б, г)	0,37	0,40	0,43
	Грушевидный (см. рис. 83, в)	0,42	0,46	0,50
Двухслойная	Трапецеидальный (см. рис. 83, а, б, г)	0,36	0,37	0,40
	Грушевидный (см. рис. 83, в)	0,37	0,40	0,43

21. Определение числа полюсов трехфазной обмотки статора.

Число полюсов для двухслойной обмотки при известном шаге:

$$2p \approx \frac{0{,}8 \times z_1}{y}$$

где: z_1 – число пазов статора; y – шаг обмотки статора. При получении по формуле значения больше двух, но меньше четырех следует принять $2p = 2$. Например, при $z_1 = 36$ и $y = 10$:

$$2p \approx \frac{0{,}8 \times 36}{10} \approx 2{,}9 \approx 2$$

Число полюсов для однослойной или двухслойной обмотки при известном числе пазов на полюс и фазу q:

$$2p = \frac{z_1}{3 \times q}$$

В однослойных концентрических и шаблонных обмотках, где катушки расположены одна внутри другой, q можно легко определить по расположению лобовых частей.
Например, в обмотках (см. рис. 12 и 15) выделяем катушечную группу или полугруппу. На рис. 12 катушечная группа расположена в пазах 1, 2 и 7, 8; на рис. 15 (обмотка вразвалку) полугруппа занимает пазы 3, 4 и 13, 14. Группа (полугруппа) охватывает две фазы, т. е. число пазов $2q$. На рис. 12 – это пазы 3, 4, 5, 6, т. е. $2q = 4$, и, следовательно, $q = 2$, а на рис. 15 – пазы 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, т. е. $2q = 8$ и $q = 4$.
Если невозможно по обмотке определить q и y, то число полюсов можно предварительно найти по формуле:

$$2p \approx 0{,}54 \div 0{,}6 \times \frac{Di}{hc}$$

где: Di – внутренний диаметр статора, *мм*.; hс – высота спинки статора (расстояние от наружной поверхности сердечника до дна паза), *мм*.

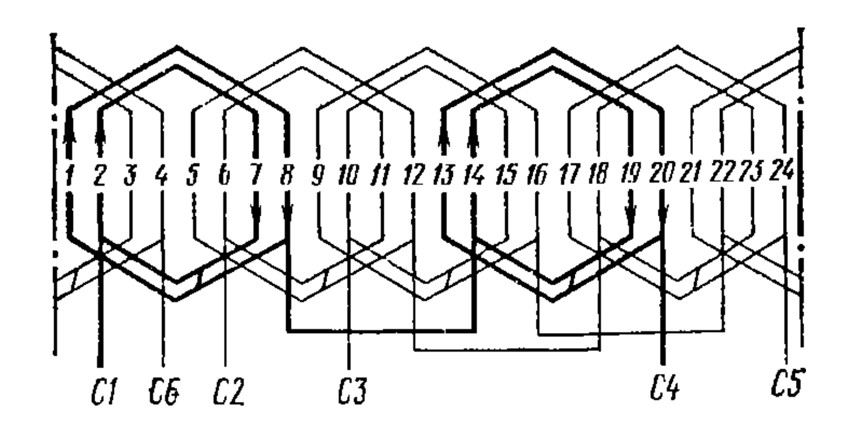


Рис. 12. Концентрическая обмотка статора при
$2p$ = 4, z = 24, q = 2, a = 1, y = 7; 5 (1 – 8, 2 – 7)

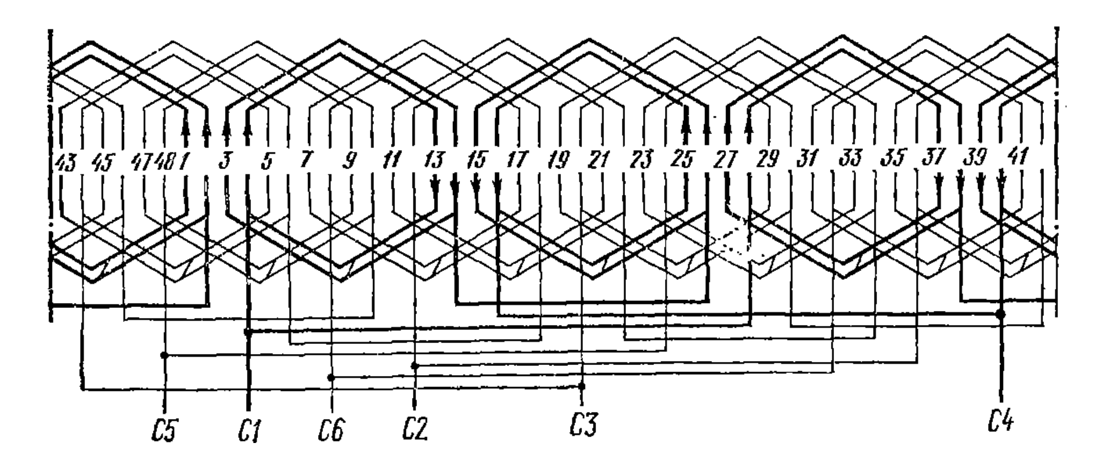


Рис. 15. Концентрическая обмотка статора вразвалку при
$2p$ = 4, z = 48, q = 4, a = 2, y = 11; 9, (1 – 2; 2 – 11).

Правильность выбора числа полюсов в сомнительных случаях следует проверить по соотношению чисел пазов ротора z_2 и статора z_1 (табл. 43).

25. Расчет обмоточных данных статора трехфазного асинхронного двигателя со всыпной обмоткой (расчет обмоточных данных приведен для двигателей старых серий, данные для серий А2, АО2 и 4А приведены в конце справочника).

Полюсное деление, часть длины окружности расточки статора, приходящейся на один полюс:

$$\tau = \frac{3{,}14 \times Di}{2p} \text{ см.}$$

где: Di – внутренний диаметр статора, *см*.
Площадь полюсного деления (*см*²):

$$Q\delta = \tau \times l$$

где: l – длина статора (без вентиляционных каналов), *см*. Число последовательно соединенных витков w в фазе обмотки находим по табл. 44. Окончательное число витков уточняется после определения числа проводников в пазе и проверки индукции в воздушном зазоре, спинке статора и зубцах (табл. 45).

Высота спинки статора (*см*.):

$$hc = 0{,}5 \times (Da - Di - 2 \times h\text{п})$$

где: Da – наружный диаметр статора, *см*.; hп – глубина паза, *см*.

Таблица 43. Числа пазов короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей.

$2p$	z_1	z_2 при пазах	
		прямых	скошенных
2	12	9, 15	–
	18	11, 12, 15, 21, 22	14, 18, 19, 22, 26, 28, 30, 31,33, 34, 35
	24	15, 16, 17, 19, 32	18, 19, 20, 22, 26, 31, 33, 34, 35
	30	22, 38	19, 20, 21, 23, 24, 37, 39, 40
	36	26, 28, 44, 46	25, 27, 29, 43, 45, 47
	42	32, 33, 34, 50, 52	–
	48	38, 40, 56, 58	37, 39, 41, 55, 57, 59
4	12	9	15
	18	10, 14	18, 22
	24	15, 16, 17, 32	16, 17, 18, 20, 30, 32, 34, 45, 48
	36	26, 44, 46	24, 27, 28, 30, 32, 34, 45, 48
	42	34, 50, 52, 54	33, 34, 38, 51, 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	36, 38, 39, 40, 44, 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48, 49, 51, 56, 64, 69, 71
	72	62, 64, 80, 82, 86	61, 63, 68, 76, 81, 83
6	63	26, 46, 48	28, 33, 47, 49, 50
	54	44, 64, 66, 68	42, 43, 50, 51, 65, 67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57, 59, 60, 61, 83, 85, 87, 90
	90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104	75, 77, 79, 101, 103, 105
8	36	–	28
	48	34, 36, 44, 62, 64	35, 44, 61, 63. 65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, 68, 70, 98, 100, 102, 104	68, 69, 71, 97, 99, 101
	96	72, 82, 110, 112, 114	79, 80, 81, 83, 109, 111, 113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114	70, 71, 73, 87, 93, 107, 109
	120	86, 89, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146	99, 101, 103, 117, 123, 137, 139
12	72	56, 64, 80, 88	69, 75, 80, 89, 91, 92
	90	68, 70, 74, 88, 98, 106, 108, 110	71, 73, 86, 87, 93. 94, 107, 109
	108	86, 88, 92, 110, 116, 124, 128, 130, 132	84, 89, 91, 104, 105, 111, 112, 125, 127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170, 172	125, 127, 141, 147, 161, 163

Число эффективных проводников в пазе:

$$N = \frac{6 \times w \times a}{z_1}$$

где: a – число параллельных ветвей; z_1 – число пазов статора, w – число последовательно соединенных витков в фазе обмотки (по табл. 44).

Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z_1}{2p \times m}$$

где: m = 3 – число фаз.

Индукция в воздушном зазоре:

$$B\delta = \frac{64 \times ke \times U_{\Phi}}{kw \times Q\delta \times w}$$

где: kе – отношение эдс к напряжению (табл. 46).

Таблица 44. Число витков в зависимости от площади полюсного деления.

Qδ, *см²*	*w* при 2*p* = 2 и напряжении *U*ф, *в*				*w* при 2*p* > 2 и напряжении *U*ф, *в*			
	127	220	289	380	127	220	289	380
20	–	–	–	–	610	1060	1390	1830
22	–	–	–	–	565	980	1290	1700
24	–	–	–	–	520	900	1180	1560
26	–	–	–	–	480	830	1090	1440
28	–	–	–	–	440	760	1000	1320
30	540	935	1230	1620	410	710	930	1230
35	460	800	1040	1380	350	605	800	1050
40	400	690	910	1200	305	530	695	920
45	355.	615	810	1060	270	470	615	810
50	320	555	730	960	240	415	545	720
55	290	500	660	870	220	380	500	660
60	265	460	600	790	200	346	455	600
70	225	390	510	670	170	296	390	510
80	195	340	444	585	149	258	340	446
90	172	300	390	516	132	230	300	396
100	155	270	350	465	119	206	270	357
110	141	244	320	423	108	187	246	324
120	130	225	296	390	99	170	226	297
130	120	208	273	360	92	160	210	276
140	112	194	255	336	86	149	195	258
150	105	182	239	315	80	138	182	240
160	98	170	222	294	75	130	170	225
170	91	158	207	273	70	121	159	210
180	85	147	193	255	66	114	150	198
190	80	138	182	240	62	107	141	186
200	76	132	173	228	58	100	132	174
225	68	118	154	204	52	90	118	156
250	61	106	138	183	47	81	107	141
275	55	95	125	165	43	75	98	129
300	50	87	113	150	39	68	89	117
325	46	80	104	138	36	62	82	108
350	42	73	96	126	33	57	75	99
375	39	68	89	117	31	54	71	93
400	36	63	82	108	28	49	64	84
450	33	57	75	99	26	45	59	78
500	30	52	68	90	23	40	52	69
550	27	47	62	82	–	–	–	–
600	25	43	57	75	–	–	–	–

Таблица 44. Значение индукции.

Индукции	Значение индукции, *Тл*, при мощности двигателя *P*, *кВт*		
	до 1	1 – 10	10 – 100
*B*δ	0,3 – 0,6	0,6 – 0,7	0,7 – 0,9
*B*c	1,1 – 1,5	1,2 – 1,6	1,3 – 1,6
*B*z	1,3 – 1,5	1,4 – 1,6	1,4 – 1,8

Индукция в спинке статора может быть меньше указанных значений при унификации штампов для разных чисел – полюсов, например, для 2*p* = 4 и 6; 6 и 8, когда высота спинки определяется двигателем с меньшим числом полюсов.

Таблица 46. Значения коэффициента kе.

$2p$	kе при диаметре Da, *см*.							
	6	8	10	15	20	30	40	50
2	0,97	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,99	0,99
4	0,94	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98
6	0,91	0,92	0,93	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98
8	–	–	–	0,91	0,93	0,95	0,96	0,97
10	–	–	–	–	0,89	0,92	0,94	0,95
12	–	–	–	–	–	0,90	0,92	0,93

Индукция в спинке статора:

$$B\text{с} = \frac{0{,}36 \times B\delta \times \tau}{hc}$$

Пазовое деление (*см*.):

$$t = \frac{3{,}14 \times Di}{z_1}$$

Индукция в зубцах (*Тл*):

$$Bz = \frac{B\delta \times t}{0{,}93 \times bz}$$

где: bz минимальная толщина зубца, *см*.

Диаметр провода с изоляцией (*мм*.):

$$D = \sqrt{\frac{k_{\Pi} \times F}{0{,}785 \times \mathrm{n}}}$$

Диаметр изолированного провода при ручной намотке в асинхронных машинах мощностью 0,6 *кВт* и выше должен быть меньше ширины шлица (прорези) паза на 1,5 – 2 *мм*. При коэффициенте kп = 0,4 диаметр изолированного провода можно определить без вычисления по рис. 84, 85. При других значениях kп полученное значение надо умножить на коэффициент k (табл. 47).

Таблица 47. Коэффициент k при различных значениях kп.

kп	k	kп	k
0,36	0,95	0,43	1,04
0,37	0,96	0,46	1,08
0,40	1,00	0,50	1,12

Пример. Определить диаметр изолированного провода при F = 170 *мм*², n = 82 и kп = 0,36. По рис. 84 находим, что при kп = 0,4 D = 1,02 *мм*. по табл. 47 k = 0,95. При kп = 0,36 получаем D = 0,95 × 1,02 = 0,97 *мм*. Диаметр провода без изоляции определяется в зависимости от марки провода.

Фазный ток обмотки статора (A):

$$I_{\Phi} = j \times S_{\text{ЭЛ}} \times n_{\text{ЭЛ}} \times a$$

где: j – плотность тока, A/*мм*² (табл. 48); $S_{\text{ЭЛ}}$ – сечение элементарного проводника, *мм*².

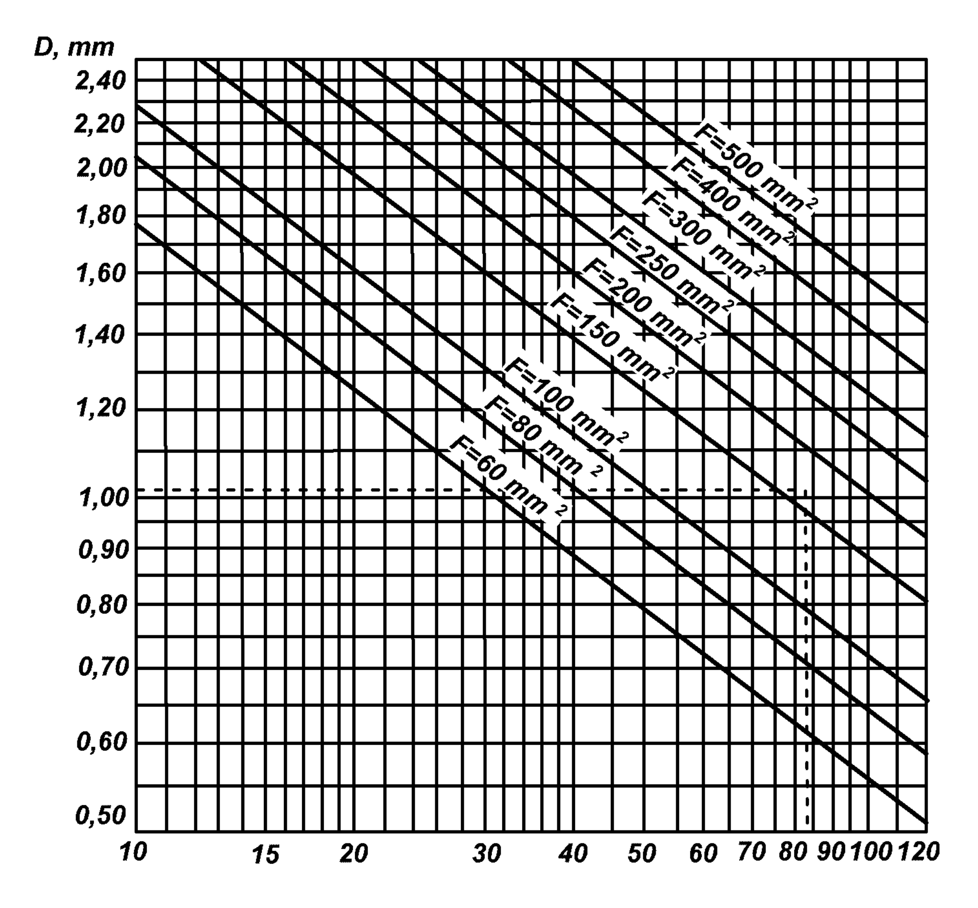


Рис. 84. Определение диаметра изолированного провода D при kп = 0,4 и числе проводников в пазе n = 10 ÷ 120.

Для определения номинальной мощности для микродвигателей (до 600 – 1000 *Вт*) вначале находят полную мощность (вольт × ампер):

$$P' = 3 \times U_{\Phi} \times I_{\Phi} \quad BA$$

а затем номинальную мощность:

$$P_{\text{Н}} = P' \times \eta \times cos\varphi \quad \text{Вт}$$

где: η × cosφ – энергетический кпд (табл. 49).
Номинальная мощность для малых и средних двигателей (до 100 *кВт*) при числе полюсов $2p$ = 2 и известном I_{Φ} определяется по рис. 86; при $2p$ = 4 полученное значение надо уменьшить на 6 – 8%, при $2p$ = 6; 8 – на 5 – 15% (бóльший процент для двигателей меньшей мощности).

Таблица 48. Плотности тока в асинхронных двигателях.

Da, см.	j, $A/мм^2$, в двигателях	
	защищенных	закрытых обдуваемых
130 – 200	6,5 – 5,5	6,0 – 4,5
300 – 500	5,5 – 4,5	4,5 – 3,5

Таблица 49. Энергетический кпд микродвигателей с короткозамкнутым ротором.

$2p$	cosφ при полной мощности *P'*, *BA*	
	150 – 400	400 – 1000
2	0,4 – 0,6	0,6 – 0,7
4	0,3 – 0,5	0,5 – 0,6

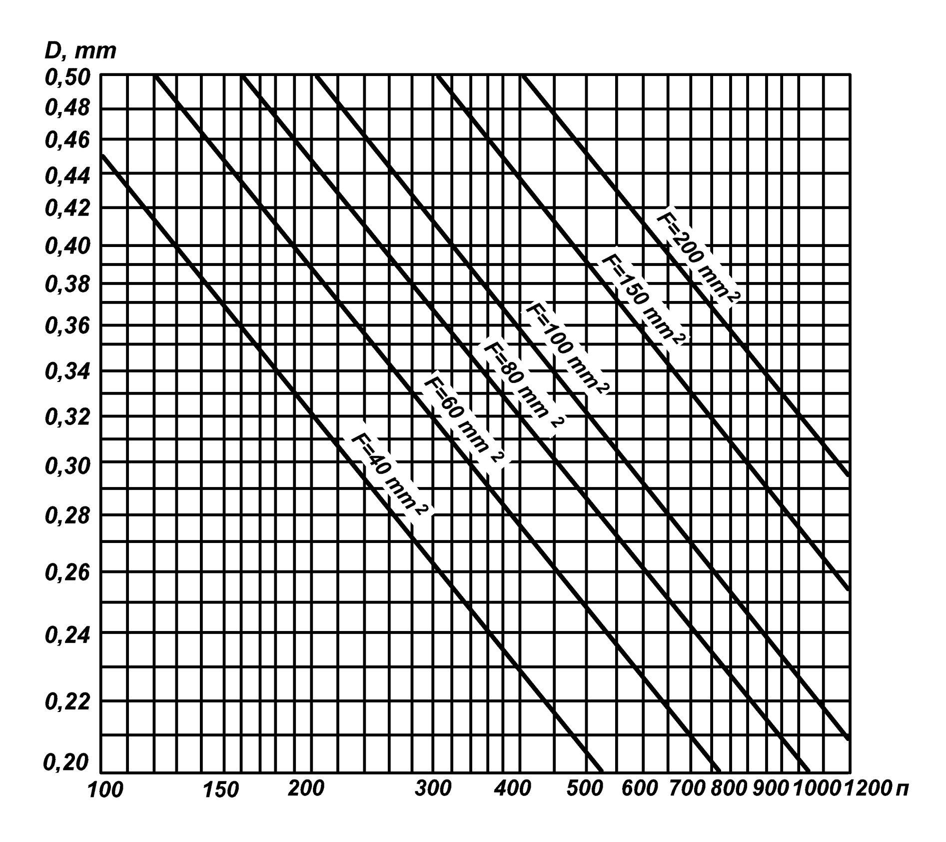


Рис. 85. Определение диаметра изолированного провода D при kп = 0,4 и числе проводников в пазе n = 120 ÷ 1200.

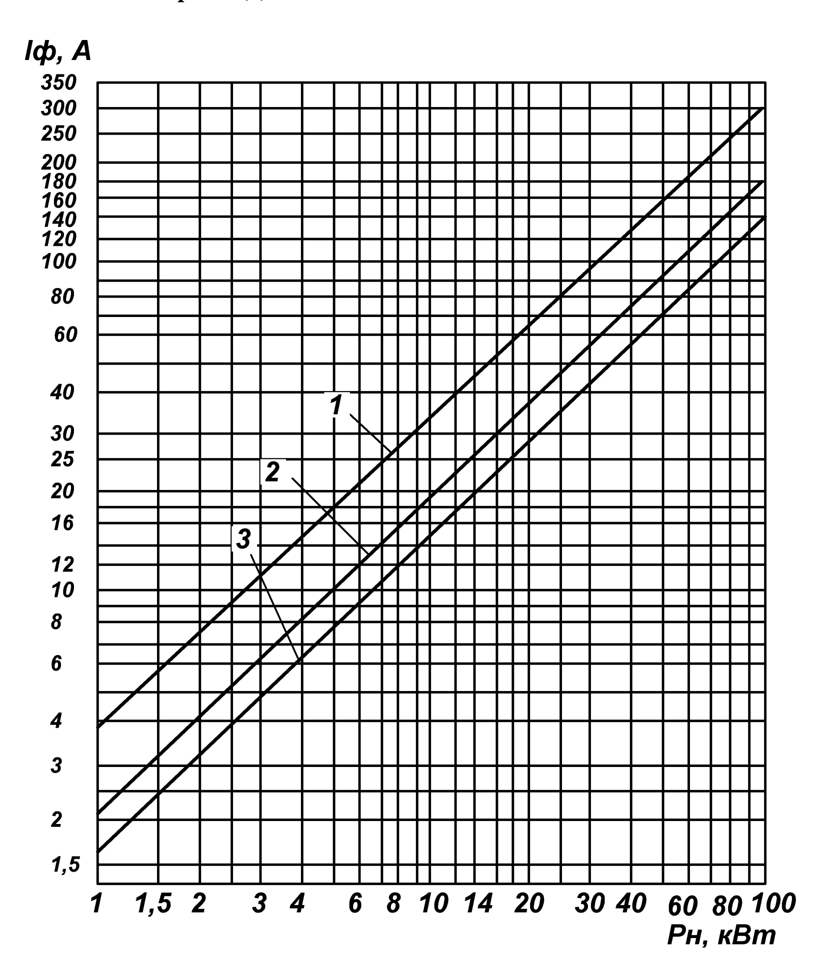


Рис. 86. Зависимость мощности P от тока фазы $I_Ф$ при числе полюсов $2p$ = 2 и напряжении $U_Ф$:
1 – 127 *в*. 2 – 220 *в*, 3 – 289 *в* (фазное напряжение при напряжении сети 500 *в* и соединении фаз звездой)

26. Пересчет обмотки статора на другое напряжение.

Число эффективных проводников в пазе:

$$N_{\text{НОВ}} = \left(N_{\text{СТ}} \times \frac{N_{\text{НОВ}}}{U_{\text{СТ}}}\right) \times \left(\frac{a_{\text{НОВ}}}{a_{\text{СТ}}}\right)$$

Когда число проводников в пазе большое (не менее 25), полученное значение $N_{\text{НОВ}}$ можно округлить до целого числа, так как при этом погрешность будет невелика (не превысит 2,5%). При числе проводников в пазе меньше 25 дробное значение можно превратить в целое (или близкое к нему) путем увеличения числа параллельных ветвей новой обмоткн. В двухслойной обмотке при нечетном числе проводников в пазе необходимо изготовить разновитковые катушки.

Если $a_{\text{НОВ}} = a_{\text{СТ}}$ новое число эффективных проводников в пазе можно определить по диаграмме рис. 87. Например, при фазном напряжении 220 *в* число проводников равно 25. На вертикали 220 *в* находим точку 25, проводим от нее вправо и влево горизонтальную линию и находим число проводников при других напряжениях: 14,5 при 127 *в*, 33 при 289 *в*, 43 при 380 *в*.
Диаметр провода без изоляции при $a_{\text{НОВ}} \times n_{\text{ЭЛНОВ}} = a_{\text{СТ}} \times n_{\text{СТ}}$ определяем по диаграмме рис. 88. Например, при $U_{\text{СТ}}$ = 380 *в* диаметр провода d = 1,25 *мм*. Проведя от найденной точки 1,25 *мм*. на вертикали 380 *в* горизонтальную линию, находим диаметры при других стандартных напряжениях: 2,16 *мм*. при 127 *в*; 1,65 *мм*. при 220 *в* 1,43 *мм*. при 289 *в*. Полученные результаты округляют до ближайших стандартных значений диаметров. При $a_{\text{НОВ}} \times n_{\text{ЭЛНОВ}} \neq a_{\text{СТ}} \times n_{\text{СТ}}$ полученный по рис. 88 диаметр (до округления) умножают на коэффициент kd (табл. 50).

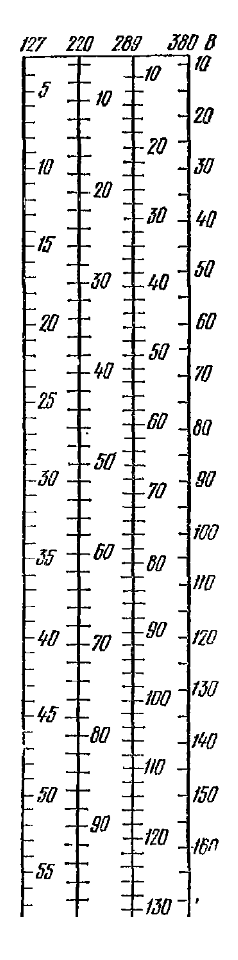


Рис. 87. Диаграмма для определения числа эффективных проводников в пазе при $a_{\text{НОВ}} = a_{\text{СТ}}$.

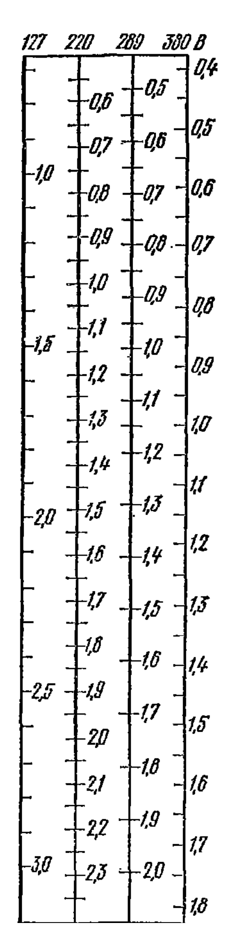


Рис. 88. Диаграмма для определения диаметра провода без изоляции при $a_{\text{НОВ}} \times n_{\text{ЭЛНОВ}} = a_{\text{СТ}} \times n_{\text{СТ}}$.

Таблица 50. Значения коэффициента *kd*.

Произведение $a_{НОВ} \times n_{ЭЛНОВ}$	*kd* при произведении $a_{СТ} \times n_{СТ}$													
	1	2	3	4	5	6	8	9	10	12	15	16	18	20
1	1	1,41	1,73	2,00	2,24	2,45	2,83	3,0	–	–	–	–	–	–
2	0,71	1,00	1,22	1,41	1,58	1,73	2,00	2,12	2,24	2,45	2,74	2,83	3,00	–
3	0,58	0,82	1,00	1,16	1,29	1,41	1,64	1,73	1,83	2,00	2,24	2,31	2,45	2,58
4	0,50	0,71	0,87	1,00	1,12	1,23	1,41	1,5	1,58	1,73	1,94	2,00	2,12	2,24
5	0,45	0,63	0,78	0,90	1,00	1,1	1,27	1,34	1,41	1,55	1,73	1,79	1,90	2,00
6	0,41	0,58	0,71	0,82	0,91	1,00	1,16	1,22	1,29	1,41	1,58	1,63	1,73	1,83
8	–	0,50	0,61	0,71	0,79	0,87	1,00	1,06	1,12	1,22	1,37	1,41	1,50	1,58
9	–	0,47	0,58	0,67	0,75	0,82	0,94	1,00	1,05	1,16	1,29	1,33	1,41	1,49
10	–	–	0,55	0,63	0,71	0,78	0,90	0,95	1,00	1,1	1,22	1,27	1,34	1,41
12	–	–	0,50	0,58	0,65	0,71	0,82	0,87	0,91	1,00	1,12	1,16	1,22	1,29
15	–	–	–	0,52	0,58	0,65	0,73	0,78	0,82	0,90	1,00	1,03	1,1	1,16
16	–	–	–	0,50	0,56	0,61	0,71	0,75	0,79	0,87	0,97	1,00	1,06	1,12
18	–	–	–	–	0,53	0,58	0,67	0,71	0,75	0,82	0,91	0,94	1,00	1,05
20	–	–	–	–	0,50	0,55	0,63	0,67	0,71	0,78	0,87	0,90	0,95	1,00

Например, по рис. 88 найден диаметр d = 2,16 *мм*. В старой обмотке произведение $a_{СТ} \times n_{СТ}$ = 2 × 2 = 4, в новой обмотке выбрано $a_{НОВ} \times n_{ЭЛНОВ}$ = 5 × 2 = 10. На пересечении графы 4 и строки 10 находим: kd = 0,63. Новый диаметр будет равен d = 2,16 – 0,63 = 1,36 *мм*.

27. Пересчет трехфазной обмотки на однофазную.

Главная обмотка в однофазном асинхронном двигателе обычно занимает ⅔ пазов сердечника статора. Число проводников в пазе для главной обмотки однофазного двигателя:

$$N_{Г} = (0{,}5 \div 0{,}7) \times \frac{N \times U_{С}}{U_{Ф}}$$

где: N – число проводников в пазе трехфазного двигателя; $U_{Ф}$ – номинальное напряжение фазы трехфазного двигателя, В; $U_{С}$ – напряжение однофазной сети, *в*.
Меньшие значения числового коэффициента в скобках соответствуют двигателям большей мощности (около 1 *кВт*) с кратковременным или повторно-кратковременным режимом работы.
Сечение провода без изоляции главной обмотки можно определить по формуле:

$$S_{Г} = \frac{S \times N}{N_{Г}}$$

где: S – сечение провода обмотки трехфазного электродвигателя, *мм*². Вспомогательная (пусковая) обмотка укладывается в ⅓ пазов статора и обычно выполняется с дополнительным внешним сопротивлением или с бифилярными катушками.
Во вспомогательной обмотке с дополнительным внешним сопротивлением число проводников в пазе:

$$N_{П} = (0{,}7 \div 1) \times N_{Г}$$

сечение провода (*мм*²):

$$S_{П} = (1{,}4 \div 1) \times S_{Г}$$

Дополнительное сопротивление ($Ом$) предварительно определяется по формуле:

$$R\text{п} = \frac{(1{,}6 \div 8) \times 10^{-3} \times Uc}{S\text{п}}$$

и окончательно уточняется при испытании электродвигателя.
В пусковой обмотке с бифилярными катушками число проводников в пазе для основной секции:

$$N'\text{п} = (1{,}3 \div 1{,}6) \times N\text{г}$$

число проводников в пазе для бифилярной секции:

$$N''\text{п} = (0{,}45 \div 0{,}25) \times N'\text{п}$$

общее число проводников в пазе:

$$N\text{п} = N'\text{п} + N''\text{п}$$

сечение провода:

$$S'\text{п} = S''\text{п} \approx 0{,}5 \times S\text{г}$$

Наилучшие пусковые свойства однофазного двигателя достигаются при применении обмотки с дополнительным внешним сопротивлением, так как имеется возможность увеличить пусковой момент без перемотки обмотки. Ток (А) в рабочей обмотке однофазного двигателя (при числе параллельных ветвей a = 1):

$$I = j\text{г} \times S\text{г}$$

где: jг – плотность тока в рабочей обмотке, $А/мм^2$, выбирается в пределах от 6 до 10 А/$мм^2$ (большие значения для микродвигателей меньшей мощности).

Полная мощность двигателя ($ВА$):

$$P' = U\text{c} \times I$$

Мощность на валу двигателя ($Вт$):

$$P \approx P' \times \eta \times cos\varphi$$

где: cosφ – энергетический кпд (табл. 51).

Во время пуска однофазный двигатель, переделанный из трехфазного, иногда застревает на низкой частоте вращения. Такое явление часто наблюдается у двухполюсных двигателей. Условия пуска улучшаются при увеличении воздушного зазора и применении двухслойных обмоток с укорочением шага на ⅓ полюсного деления. В однофазных электродвигателях пусковой момент может значительно снизиться из-за падения напряжения в подводящих проводах при большом пусковом токе, на который однофазные сети обычно не рассчитаны. В этом случае, необходимо увеличить сечение подводящих проводов от источника питания.

Таблица 51. Энергетический кпд однофазных асинхронных двигателей с пусковыми элементами.

P', $ВА$	η×cosφ при числе полюсов		P' $ВА$	η×cosφ при числе полюсов	
	$2p$ = 2	$2p$ = 4		$2p$ = 2	$2p$ = 4
100	0,30	0,15	600	0,49	0,38
150	0,32	0,19	300	0,52	0,43
200	0,34	0,22	4000	0,54	0,46
400	0,43	0,31			

28. Включение трехфазных двигателей в однофазную сеть без перемотки.

Трехфазный асинхронный двигатель может работать от однофазной сети как однофазный с пусковым элементом или как однофазный конденсаторный с постоянно включенной рабочей емкостью.

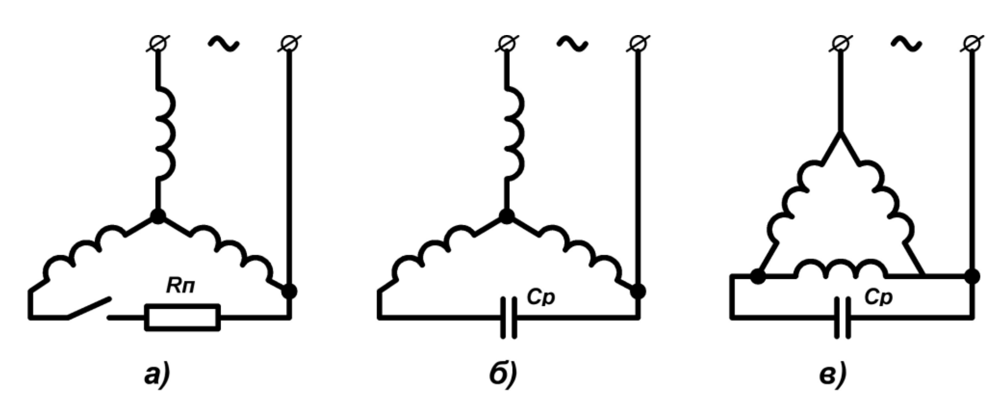


Рис. 89. Схемы включения в однофазную сеть трехфазных двигателей с тремя выводами:
а – схема с пусковым сопротивлением, б, в – схемы с рабочей емкостью.

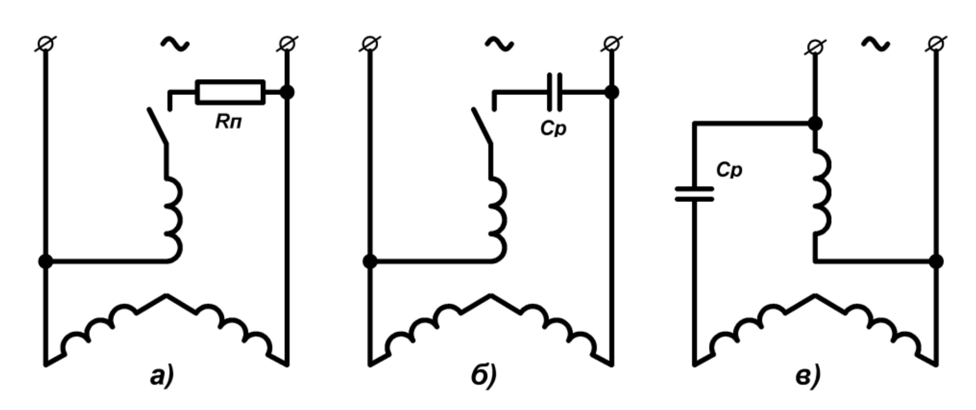


Рис. 90. Схемы включения в однофазную сеть трехфазных двигателей с шестью выводами:
а – схема с пусковым сопротивлением, б, е – схемы с рабочей емкостью.

Применение двигателя в качестве конденсаторного предпочтительнее. Если принять за 100% мощность трехфазного двигателя обозначенную на его щитке, то при однофазном включении двигатель может развить 50 – 70% этой мощности, а при использовании в качестве конденсаторного – 70 – 85% и более. Еще одно преимущество конденсаторного двигателя заключается в том, что отсутствует специальное пусковое устройство, которое необходимо при однофазной схеме для отключения пусковой обмотки после разгона двигателя. Схему включения (рис. 89, 90) надо выбирать с учетом напряжения сети и номинального напряжения двигателя. Например, при трех выведенных концах обмотки статора (рис. 89) двигатель может быть использован в сети, напряжение которой равно номинальному напряжению двигателя.
При шести выводных концах обмотки двигатель имеет два номинальных напряжения: 127/220 *в*, 220/380 *в*. Если напряжение сети равно большему номинальному напряжению двигателя, т. е. *U*с = 220 *в* при номинальном напряжении 127/220 *в* или *U*с = 380 *в* при номинальном напряжении 220/380 *в* и т. д., то надо пользоваться схемами, приведенными на рис. 89, а, б. При напряжении сети, равном меньшему номинальному напряжению двигателя, следует применять схему, показанную на рис. 89, в. В этом случае при однофазном включении значительно уменьшается мощность двигателя, поэтому целесообразно применять схемы с рабочей емкостью.

Рабочая емкость Cр (*мкФ*) для каждой схемы должна иметь определенное значение и может быть подсчитана, исходя из напряжения однофазной сети Uс и номинального тока $I_Ф$ в фазе трехфазного двигателя:

$$C\text{р} \approx \frac{k \times I_Ф}{U\text{с}}$$

где: k – коэффициент, зависящий от схемы включения. При частоте 50 *гц* для схем по рис. 89, б и 90, б можно принять k = 2800; для схемы по рис. 89, в – k = 4800; для схемы по рис. 90, в – k = 1600.

Напряжение на конденсаторе $U_К$ также зависит от схемы включения и напряжения сети. Для схем по рис. 89, б, в оно может быть принято равным напряжению сети; для схемы по рис. 90, б – $U_К \approx 1{,}15 \times U$с; для схемы по рис. 90, в – $U_К = 2 \times U$с.

Номинальное напряжение конденсатора должно быть равно или несколько больше расчетного значения.

Необходимо помнить, что конденсаторы после отключения длительное время сохраняют напряжение на своих зажимах и создают при прикосновении к ним опасность поражения человека электрическим током. Опасность поражения тем выше, чем больше емкость и выше напряжение на включенном в схему конденсаторе. При ремонте или отладке двигателя необходимо после каждого отключения конденсатор разрядить. Для защиты от случайного прикосновения в процессе эксплуатации двигателя конденсаторы должны быть жестко закреплены и ограждены.

Пусковое сопротивление Rп определяют опытным путем, используя регулируемое сопротивление (реостат).

Предварительно Rп может быть подсчитано по формуле (см. стр. 11). Если необходимо получить увеличенный момент при пуске двигателя, то параллельно рабочему конденсатору включают пусковой. Его емкость обычно подсчитывают по формуле:

$$C\text{п} \approx (2{,}5 \div 3) \times C\text{р}$$

где: Cр – емкость рабочего конденсатора. Пусковой момент при этом получается близким к номинальному моменту трехфазного двигателя.

29. Пересчет обмотки при изменении частоты питающей сети.

При изменении частоты $f_{СТ}$ на другую $f_{НОВ}$ число эффективных проводников в пазе изменяется обратно пропорционально частоте:

$$N_{НОВ} = \frac{N_{СТ} \times f_{СТ}}{f_{НОВ}}$$

Сечение и диаметр провода изменяются соответственно:

$$S_{НОВ} = \frac{S_{CT} \times N_{СТ}}{N_{НОВ}}$$

$$d_{НОВ} = d_{СТ} \times \sqrt{\frac{N_{СТ}}{N_{НОВ}}}$$

Мощность при новой частоте (кВт):

$$P_{НОВ} = \frac{P_{СТ} \times f_{НОВ}}{f_{СТ}}$$

В случае значительного повышения частоты (с 50 на 200 – 400 *гц*) мощность, подсчитанная по приведенной формуле, должна быть уменьшена на 15 – 35% из-за увеличения потерь в меди обмотки, вызванных явлением поверхностного эффекта, и в стали сердечника.

При пересчете на $f_{НОВ} > f_{СТ}$ следует проверить окружную скорость ротора, так как при повышении частоты вращения в элементах ротора могут возникнуть недопустимо большие механические напряжения. Частота вращения двигателя изменяется пропорционально отношению частот:

$$n_{НОВ} = \frac{n_{СТ} \times f_{НОВ}}{f_{СТ}}$$

30. Расчет массы и сопротивления всыпной обмотки статора.

Средняя ширина (*см.*) катушки двухслойной и однослойной цепной обмоток:

$$\tau y = \frac{3{,}14 \times (Di + h\text{п}) \times y}{z_1}$$

Длина лобовой части (*см.*):
1) двухслойной и однослойной цепной обмоток

$$l\text{л} = k\text{л} \times \tau y + 2$$

где: kл – коэффициент, выбираемый по табл. 52.

2) однослойной концентрической обмотки:

$$l\text{л} = 1{,}4 \times \tau \times (2 \div 5)$$

Формула вычисления полюсного деления τ приведена на странице 5.
Большие значения в скобках предназначены для более крупных машин.

Таблица 52. Коэффициенты kл и kв для расчета обмотки.

$2p$	Лобовые части не изолированы		Лобовые части изолированы лентой	
	кл	*кв*	*кл*	*кв*
2	1,2	0,26	1,45	0,44
4	1,3	0,40	1,55	0,50
6	1,4	0,50	1.75	0,62
8 и более	1,5	0,50	1,90	0,72

Примечание. Для однослойной цепной обмотки берут на 10 – 15% больше.

Вылет лобовой части (*см.*) для двухслойной обмотки (от торца сердечника):

$$l\text{в} = k\text{в} \times \tau y + 2$$

где kв – по табл. 52.
Средняя длина полувнтка (*см.*):

$$l\text{пв} = l\text{л} + l_1$$

Обшая длина проводника (*км.*) на обмотку:

$$L = l\text{пв} \times z_1 \times n \times 10^{-5}$$

Масса медного провода (*кг.*) без изоляции:

$$M\text{м} = 7 \times L \times d^2$$

Масса провода (*кг.*) с изоляцией:

$$M = \left[0{,}876 + 0{,}124 \times \left(\frac{D}{d}\right)^2\right] \times M\text{м}$$

Сопротивление фазы трехфазной обмотки ($Ом$):

$$r = \frac{5,85 \times L}{S \times (n_{эл} \times a)^2}$$

31. Замена диаметров проводов.

Диаметр заменяющего провода и число параллельных проводников подбирают по табл. 53.

Таблица 53. Данные для подбора числа параллельных проводников при изменении диаметра проволоки.

Обозначения: d – диаметр проволоки, *мм*.; D – максимальный наружный диаметр провода, *мм*.; $n_{эл}$ – число параллельных (элементарных) проводников; $S_{эф}$ – сечение эффективного проводника, $мм^2$; $v = n_{эл} \times D^2$ – условная площадь, занимаемая изолированными проводниками, $мм^2$.

d	$S_{эф}$ при параллельных проводников						v при числе параллельных проводников					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0,5	0,196	0,393	0,589	0,79	0,98	1,18	0,325	0,65	0,97	1,30	1,62	1,95
0,51	0,204	0,408	0,613	0,82	1,02	1,23	0,336	0,67	1,01	1,35	1,68	2,02
0,53	0,221	0,441	0,662	0,88	1,10	1,32	0,360	0,72	1,08	1,44	1,80	2,16
0,55	0,238	0,475	0,713	0,95	1,19	1,42	0,384	0,77	1,15	1,54	1,92	2,31
0,56	0,246	0,493	0,739	0,99	1,23	1,48	0,397	0,79	1,19	1,59	1,98	2,38
0,57	0,255	0,510	0,766	1,02	1,28	1,53	0,410	0,82	1,23	1,64	2,05	2,46
0,59	0,273	0,547	0,820	1,09	1,37	1,64	0,436	0,87	1,31	1,74	2,18	2,61
0,60	0,283	0,565	0,848	1,13	1,41	1,70	0,449	0,90	1,35	1,80	2,24	2,69
0,62	0,302	0,604	0,906	1,21	1,51	1,81	0,476	0,95	1,43	1,90	2,38	2,86
0,63	0,312	0,623	0,935	1,25	1,56	1,87	0,490	0,98	1,47	1,96	2,45	2,94
0,64	0,322	0,643	0,965	1,29	1,61	1,93	0,518	1.04	1,56	2,07	2,59	3,11
0,67	0,353	0,705	1,058	1,41	1,76	2,12	0,563	1,13	1,69	2,25	2,81	3,38
0,69	0,374	0,748	1,122	1,50	1,87	2,24	0,593	1.19	1,78	2,37	2,96	3,56
0,71	0,396	0,792	1,188	1,58	1,98	2,38	0,624	1,25	1,87	2,50	3,12	3,74
0,72	0,407	0,814	1,221	1,63	2,04	2,44	0,640	1,28	1,92	2,56	3,20	3,84
0,74	0,430	0,860	1,290	1,72	2,15	2,58	0,689	1,38	2,07	2,76	3,44	4,13
0,75	0,442	0,884	1,325	1,77	2,21	2,65	0,706	1,41	2,12	2,82	3,53	4,23
0,77	0,466	0,931	1,400	1,86	2,33	2,79	0,740	1,48	2,22	2,96	3,70	4,44
0,80	0,503	1,005	1,510	2,01	2,51	3,02	0,792	1,58	2,38	3,17	3,96	4,75
0,83	0,541	1,082	1,623	2,16	2,71	3,25	0,846	1,59	2,54	3,39	4,23	5,08
0,85	0,567	1,135	1,702	2,27	2,84	3,40	0,884	1,77	2,65	3,53	4,42	5,30
0,86	0,581	1,162	1,743	2,32	2,90	3,49	0,903	1,81	2,71	3,61	4,51	5,42
0,90	0,636	1,272	1,910	2,54	3,18	3,82	0,980	1,96	2,94	3,92	4,90	5,88
0,93	0,679	1,359	2,038	2,72	3,40	4,08	1,040	2,08	3,12	4,16	5,20	6,24
0,95	0,709	1,418	2,126	2,84	3,54	4,25	1,082	2,16	3,24	4,33	5,41	6,49
0,96	0,724	1,448	2,171	2,90	3,62	4,34	1,103	2,21	3,31	4,41	5,51	6,62
1,00	0,785	1,571	2,356	3,14	3,93	4,71	1,210	2,42	3,63	4,84	6,05	7,26
1,04	0,849	1,699	2,548	3,40	4,25	5,10	1,323	2,65	3,97	5,29	6,61	7,94
1,06	0,882	1,765	2,647	3,53	4,41	5,29	1,346	2,69	4,04	5,38	6,73	8,07
1,08	0,916	1,832	2,748	3,66	4,58	5,50	1,392	2,78	4,18	5,57	6,96	8,35
1,12	0,985	1,970	2,956	3,94	4,93	5,91	1,488	2,98	4,47	5,95	7,44	8,93

Продолжение табл. 53

d	$S_{эф}$ при параллельных проводников						v при числе параллельных проводников					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1,16	1,057	2,114	3,170	4,23	5,28	6,34	1,613	3,23	4,84	6,45	8,06	9,68
1,18	1,094	2,187	3,28	4,37	5,47	6,56	1,638	3,28	4,92	6,55	8,19	9,83
1,20	1,131	2,262	3,39	4,52	5,65	6,79	1,716	3,43	5,15	6,86	8,58	10,30
1,25	1,227	2,454	3,68	4,91	6,14	7,36	1,823	3,65	5,47	7,29	9,11	10,94
1,30	1,327	2,655	3,98	5,31	6,64	7,96	1,988	3,98	5,96	7,95	9,94	11,93
1,32	1,368	2,737	4,11	5,47	6,84	8,21	2,016	4,03	6,05	8,07	10,08	12,10
1,35	1,431	2,863	4,29	5,73	7,16	8,59	2,132	4,26	6,39	8,53	10,66	12,79
1,40	1,539	3,079	4,62	6,16	7,70	9,24	2,280	4,56	6,84	9,12	11,40	13,68
1,45	1,651	3,303	4,95	6,61	8,26	9,91	2,434	4,87	7,30	9,73	12,17	14,60
1,50	1,767	3,534	5,30	7,07	8,84	10,60	2,592	5,18	7,78	10,37	12,96	15,55
1,56	1,911	3,823	5,73	7,65	9,56	11,47	2,789	5,58	8,37	11,16	13,94	16,73
1,60	2,011	4,021	6,03	8,04	10,05	12,06	2,924	5,85	8,77	11,70	14,62	17,54
1,62	2,061	4,122	6,18	8,24	10,31	12,37	2,993	5,99	8,98	11,97	14,96	17,96
1,68	2,217	4,433	6,65	8,87	11,08	13,30	3,204	6,41	9,61	12,82	16,02	19,22
1,70	2,270	4,540	6,81	9,08	11,35	13,62	3,276	6,55	9,83	13,10	16,38	19,66
1,74	2,378	4,756	7,13	9,51	11,89	14,27	3,423	6,85	10,27	13,69	17,11	20,54
1,80	2,545	5,089	7,63	10,18	12,72	15,27	3,686	7,37	11,06	14,75	18,43	22,12
1,81	2,573	5,146	7,72	10,29	12,87	15,44	3,725	7,45	11,17	14,90	18,62	22,35
1,88	2,776	5,552	8,33	11,10	13,88	16,66	4,000	8,00	12,00	16,00	20,00	24,00
1,90	2,835	5,671	8,51	11,34	14,18	17,01	4,080	8,16	12,24	16,32	20,40	24,48
1,95	2,986	5,973	8,96	11,95	14,93	17,92	4,285	8,57	12,85	17,14	21,42	25,71
2,00	3,142	6,283	9,42	12,57	15,71	18,85	4,494	8,99	13,48	17,98	22,47	26,97
2,02	3,205	6,409	9,61	12.82	16,02	19,23	4,580	9,16	13,74	18,32	22,90	27,48
2,10	3,464	6,927	10,39	13,85	17,32	20,78	4,973	9,95	14,92	19,89	24,86	29,84
2,12	3,530	7.060	10,59	14,12	17,65	21,18	5,018	10,04	15,05	20,07	25,09	30,11
2,24	3,941	7,882	11,82	15,76	19,70	23,64	5,617	11,23	16,85	22,47	28,08	33,70
2,26	4,011	8,023	12,03	16,05	20,06	24,07	5,712	11,42	17,14	22,85	28,56	34,27
2,36	4,374	8,749	13,12	17,50	21,87	26,25	6,200	12,40	18,60	24,80	31,00	37,20
2,44	4,676	9,352	14,03	18,70	23,38	28,06	6,605	13,21	19,81	26,42	33,02	39,63
2,50	4,909	9,817	14,73	19,63	24,54	29,45	6,917	13,83	20,75	27,67	34,58	41,50

Примечание. v приведено для проводов марок ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭТ-155, ПЭТВ-2.

Пример 1 Данные старой обмотки: d = 0,93 *мм.*; $n_{эл}$ = 2; a = 1 (число параллельных ветвей). Подобрать по табл. 53 диаметры проводов, которыми можно заменить провод старой обмоткн без изменения числа параллельных ветвей. Находим по табл. 53 для старой обмотки: $S_{эф}$ = 1,359 *мм*² и v = 2,08. Находим варианты замены провода:

1. d = 1,30 *мм.*; $n_{эл}$ = 1; $S_{эф}$ = 1,327 *мм*²; v = 1,988.
2. d = 1,32 *мм.*; $n_{эл}$ = 1; $S_{эф}$ = l,368 *мм*²; v = 2,016.
3. d = 1,35 *мм.*; $n_{эл}$ = 1; $S_{эф}$ =1,431 *мм*²; v = 2,132.

Вариант 3 приводит к увеличению коэффициента заполнения паза на:

$$\frac{2,132-2,08}{2,08}\times 100 \;=\; 2,5\%.$$

4. d = 0,59 *мм.*; $n_{эл}$ = 5; $S_{эф}$ = 1,37 *мм²*; v = 2,18.

Этот вариант неудобен, так как требуется применять большое число параллельных проводов и, кроме того, существенно (примерно на 5%) увеличивается коэффициент заполнения паза.

5. d = 0,64 *мм.* $n_{эл}$ = 4; $S_{эф}$ = 1,29 *мм²*; v = 2,07.

В варианте 5 сечение эффективного проводника уменьшается на:

$$\frac{1{,}359 - 1{,}29}{1{,}359} \times 100 = 5\%$$

что может заметно отразиться на параметрах машины.

6. d = 0,74 *мм.*; $n_{эл}$ = 3; $S_{эф}$ = 1,29 *мм²*; v = 2,07.
Вариант 6 также приводит к уменьшению сечения на 5% .

7. d = 0,75 *мм.*; $n_{эл}$ = 3; $S_{эф}$ = 1,325 *мм²*; v = 2,12. При этом варианте несколько увеличивается коэффициент заполнения паза на:

$$\frac{2{,}12 - 2{,}08}{2{,}08} \times 100 = 2\%$$

Окончательный вариант выбирается в зависимости от наличия провода данного диаметра, возможности уменьшения толщины пазовой изоляции (при увеличении коэффициента заполнения), возможности укладки провода через шлиц паза и т. д.

Пример 2. Данные старой обмотки: d = 1,88 *мм.*; $n_{эл}$ = 4; a = 2; $2p$ = 4; обмотка двухслойная с целым числом пазов на полюс и фазу. Подобрать по табл. 53 диаметры проводов, которыми можно заменить провод старой обмоткн.

По табл. 53 находим для старой обмотки: $S_{эф}$ = 11,1 *мм²*; v = 16,00.
По табл. 53 находим возможные варианты замены:

1. d = 1,50 *мм.*; $n_{эл}$ = 6; $S_{эф}$ = 10,6 *мм²*; v = 15,55. Здесь уменьшается сечение на:

$$\frac{11{,}1 - 10{,}6}{11{,}1} \times 100 = 4{,}5\%$$

2. d = 1,56 *мм.*; $n_{эл}$ = 6; $S_{эф}$ = 11,47 *мм²*; v = 16,73.
При варианте 2 увеличивается коэффициент заполнения паза на:

$$\frac{16{,}73 - 16{,}00}{16{,}00} \times 100 = 4{,}55\%$$

3. d = 1,70 *мм.*; $n_{эл}$ = 5; $S_{эф}$ = 11,35 *мм²*; v = 16,38.

Здесь увеличивается коэффициент заполнения паза на:

$$\frac{16{,}38 - 16{,}00}{16{,}00} \times 100 = 2{,}37\%$$

4. d = 1,90 *мм.*; $n_{эл}$ = 4; $S_{эф}$ = 11,34 *мм²*; v = 16,32.

В варианте 4 увеличивается коэффициент заполнения паза на:

$$\frac{16{,}32 - 16{,}00}{16{,}00} \times 100 = 2\%$$

5. d = 2,12 *мм.*; $n_{эл}$ = 3; $S_{эф}$ = 10,59 *мм²*; v = 15,05.

В варианте 5 уменьшается сечение эффективного проводника на:

$$\frac{11{,}1 - 10{,}59}{11{,}11} \times 100 = 4{,}6\%$$

6. Увеличивая число параллельных ветвей в два раза и уменьшая соответственно сечение эффективного проводника в два раза (число эффективных проводников в пазе при этом должно быть увеличено в два раза), определяем при a = 4; $S_{эф}$ = 5,55 *мм²*; v = 8. Находим:

1) d = 1,08 *мм.*; $n_{эл}$ = 6; $S_{эф}$ = 5,50 *мм²*; v = 8,35.

Здесь заполнение паза увеличивается на:

$$\frac{8{,}35 - 8}{8} \times 100 = 4{,}4\%$$

2) d = 1,16 *мм.*; $n_{эл}$ = 5; $S_{эф}$ = 5,28 *мм²*; v = 8,06.

Здесь сечение уменьшается на:

$$\frac{5{,}55 - 5{,}28}{5{,}55} \times 100 = 4{,}9\%$$

3) d = 1,18 *мм.*; $n_{эл}$ = 5; $S_{эф}$ = 5,47 *мм²*; v = 8,19.

Здесь заполнение паза увеличивается на:

$$\frac{9{,}19 - 8}{8} \times 100 = 2{,}3\%$$

4) d = 1,30 *мм.*; $n_{эл}$ = 4; $S_{эф}$ = 5,31 *мм²*; v = 7,95.

Здесь сечение уменьшается на:

$$\frac{5{,}55 - 5{,}31}{5{,}55} \times 100 = 4{,}34\% \text{ и т. д.}$$